

지능형 반사표면 기반 무선 전력 통신 시스템에서 실용적인 비선형 에너지 수확 모델을 고려한 전송률 분할 다중접속 방식

맹정후*, 정성아[†], 강진규[‡]

명지대학교 전자공학과*, 서울시립대학교 첨단융합학부[†], 명지대학교 정보통신공학과[‡]

andrew5696@mju.ac.kr, seongah@uos.ac.kr, jkkang@mju.ac.kr

Rate-splitting transmission for IRS-aided WPCNs with Practical Non-Linear Energy Harvesting Model

Jeonghoo Maeng*, Seongah Jeong[†], Jinkyu Kang[‡]

Myongji University^{*‡}, University of Seoul[†]

요약

본 논문은 무선 전력 통신망 (WPCNs)에서 실용적인 비선형 에너지 수확 모델, 지능형 반사표면 (IRS)과 전송률 분할 다중접속 (RSMA)을 도입하여, 사용자별 실용적인 에너지 수확 및 전송률 요구를 만족하면서 총 전송률을 극대화하는 최적화 프레임워크를 제안한다. 사용자들은 여러 그룹으로 분할되며, 매시간 슬롯마다 하나의 그룹은 정보 전송, 나머지는 에너지 수확을 수행한다. 제안된 프레임워크는 전송 자원과 IRS 설정을 공동 최적화하여 에너지 효율과 정보 전송 성능을 동시에 향상시킨다.

I. 서론

다가오는 6G 시대의 대규모 사물인터넷 (IoT : Internet of Things)에 대비해, 무선 전력 통신망 (WPCNs : Wireless Powered Communication Networks)은 안정적인 에너지 공급과 정보 전송을 동시에 제공할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있다. 하지만 물리적 한계로 인해 에너지 수집 효율이 낮다는 문제가 있다. 이를 극복하기 위해 지능형 반사표면 (IRS : Intelligent Reflecting Surface) 기술이 도입되며 연구가 활발히 진행되고 있다 [1,2]. 기존 연구에서는 비직교 다중 접속 (NOMA : Non-Orthogonal Multiple Access) [1], 그룹/사용자 전환 방식 [2] 등을 통해 전송률 및 에너지 수확 성능 향상을 시도해 왔다.

본 논문은 이러한 선행연구를 기반으로, IRS 와 전송률 분할 다중접속 (RSMA : Rate-Splitting Multiple Access)을 실용적인 비선형 에너지 수확 모델에 적용한 새로운 WPCNs 구조를 제안한다. 기존 연구와 달리 [1,2], 사용자를 여러 그룹으로 나누고, 매시간 슬롯마다 하나의 그룹은 무선 정보 전송 (WIT : Wireless Information Transmission)을 수행하며, 나머지 그룹들은 무선 에너지 전송 (WET : Wireless Energy Transmission) 그룹으로 동작하며, WIT 그룹의 업링크 신호와 액세스 포인트 (AP : Access Point)의 에너지 신호에서 동시에 에너지를 수확한다. 이를 통해 WET 시간 확보와 전송률 향상을 동시에 달성할 수 있다. 또한, RSMA 는 각 사용자 메시지를 두개의 하위 메시지로 분할하고, AP 에서는 연속 간섭 제거 (SIC : Successive Interference Cancellation)를 통해 복호화 함으로써 더욱 유연한 다중접속이 가능하다 [3]. 본 논문은 수확 에너지 및 개별 전송률 제약을 만족하면서 총 전송률을 극대화하기 위해, AP 의 빔포밍, IRS 위상 설정, 사용자 전송 전력 및 시간 할당을 공동 최적화하는 알고리즘을 제안한다.

II. 본론

본 논문에서는 그림 1 과 같이, 송신 안테나 M_T 와 수신 안테나 M_R 를 갖는 다중 안테나 Full-Duplex AP,

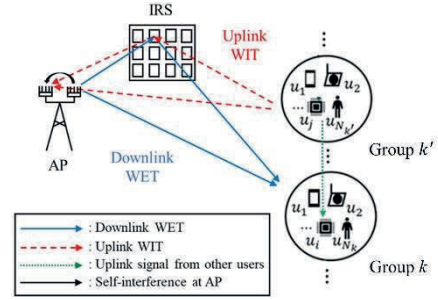


그림 1. 시스템 모델

K 개의 단일 안테나 Half-Duplex 사용자 그룹, 그리고 M 개의 반사 소자를 갖는 하나의 IRS 로 구성된다. AP 는 다운링크에서 에너지 신호를 송신하고, 동시에 업링크에서 정보를 수신한다. IRS 는 사용자 근처에 위치하여 이중 경로 손실을 최소화하도록 설계된다.

그룹 k 및 k' 의 사용자 수는 N_k 와 $N_{k'}$ 이며, 각 그룹의 사용자는 $i \in \{1, \dots, N_k\}$ 와 $j \in \{1, \dots, N_{k'}\}$ 으로 인덱싱 된다. 또한 그룹 k 의 i 번째 사용자를 $k(i)$ 로 나타낸다. 전체 프레임은 $N = K$ 개의 시간 슬롯으로 나뉘며, 각 시간 슬롯 t_k 에서는 하나의 그룹 k 만 AP 와 통신한다고 가정하여 그룹 간 간섭은 발생하지 않는다. 채널은 quasi-static flat fading 모델을 따르며, 각 프레임 동안에는 채널 상태가 고정된다고 가정한다.

시간슬롯 n 에서 WET 로 동작하는 그룹 k 의 i 번째 사용자 $k(i)$ 가 수신하는 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_{k(i),n}^{ET} = (\mathbf{h}_{AP-k(i)}^H + \mathbf{h}_{IRS-k(i)}^H \mathbf{\Theta}_n \mathbf{H}_{AP-IRS}) \mathbf{v}_n s_n + \sum_{j=1}^{N_{k'}} \{ (\mathbf{h}_{k'(j)-k(i)}^H + \mathbf{h}_{IRS-k(i)}^H \mathbf{\Theta}_n \mathbf{g}_{k'(j)-IRS}) \sqrt{p_{k'(j)}} x_{k'(j)} \} + z_{k(i),n} \quad (1)$$

각 항은 AP 의 다운링크 에너지신호, WIT 로 동작하는 그룹 k' 의 사용자들의 정보 신호를 이용한 에너지 재활용 신호, 그리고 잡음 항 $z_{k(i),n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 를 포함한다. $\mathbf{v}_n \in \mathbb{C}^{M_T \times 1}$ 는 시간 슬롯 n 에서 AP 의 에너지

벡터이며, $\mathbf{h}_{AP-k(i)} \in \mathbb{C}^{M_T \times 1}$ 와 $\mathbf{h}_{IRS-k(i)} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 각각 AP 및 IRS로부터 사용자 $k(i)$ 간의 채널이다. $\mathbf{H}_{AP-IRS} \in \mathbb{C}^{M \times M_T}$ 는 AP-IRS 간의 채널, $\mathbf{h}_{k'(j)-k(i)}$ 는 사용자 $k'(j)$ - $k(i)$ 간 채널을 의미한다. $\mathbf{g}_{k'(j)-IRS} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 사용자 $k'(j)$ 와 IRS 간의 업링크 채널이며, $\boldsymbol{\theta}_n \triangleq \text{diag}(e^{j\theta_{1,n}}, \dots, e^{j\theta_{M,n}})$ 는 위상 천이 $\theta_{m,n} \in [0, 2\pi]$ 에 따른 시간 슬롯 n 에서 IRS 의 위상 천이 행렬이다. s_n 과 $\mathbf{x}_{k'(j)}$ 는 각각 AP 의 WET 신호 그리고 사용자 $k'(j)$ 의 WIT 신호를 나타낸다. $p_{k'(j)}$ 는 사용자 $k'(j)$ 의 송신 전력을 의미한다. 이러한 수신 신호로부터 사용자 $k(i)$ 가 수신하는 전력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 P_{k(i),n}^{\text{ET}}(\mathbf{v}_n, \boldsymbol{\theta}_n) &= \|(\mathbf{h}_{AP-k(i)}^H + \mathbf{h}_{IRS-k(i)}^H \boldsymbol{\theta}_n \mathbf{H}_{AP-IRS}) \mathbf{v}_n\|^2 \\
 &+ \sum_{j=1}^{N_{k'}} p_{k'(j)} \|\mathbf{h}_{k'(j)-k(i)} + \mathbf{h}_{IRS-k(i)}^H \boldsymbol{\theta}_n \mathbf{g}_{k'(j)-IRS}\|^2 \quad (2)
 \end{aligned}$$

이를 기반으로, 에너지 수확 회로의 물리적 특성을 반영한 시그모이드 기반 비선형 에너지 수확 모델 [4]은 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi_{k(i),n}(\mathbf{v}_n, \boldsymbol{\theta}_n) = \frac{[\Psi_{k(i),n}(\mathbf{v}_n, \boldsymbol{\theta}_n) - P_{k(i)}^{\text{sat}} \Omega_{k(i)}]}{1 - \Omega_{k(i)}} \quad (3)$$

이때 $\Psi_{k(i),n}(\mathbf{v}_n, \boldsymbol{\theta}_n) = P_{k(i)}^{\text{sat}} / \{1 - \exp(-a_{k(i)}(P_{k(i),n}^{\text{ET}}(\mathbf{v}_n, \boldsymbol{\theta}_n) - b_{k(i)}))\}$ 는 시그모이드 기반 회로 동작 모델이며, $P_{k(i)}^{\text{sat}}$ 는 포화 전력 수확량을 의미한다. $\Omega_{k(i)} = P_{k(i)}^{\text{sat}} / \{1 - \exp(a_{k(i)} b_{k(i)})\}$ 는 zero input - zero output 조건을 보장하기 위한 파라미터이며, $\Phi_{k(i),n}$ 는 이 조건을 만족하는 실용적인 회로 동작 모델이다. $a_{k(i)}, b_{k(i)}$ 는 실제 회로의 수확 특성을 커브 피팅을 통해 얻어지는 물리적 파라미터이다.

AP 가 수신한 그룹 k 의 업링크 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{y}_{AP,k}^{\text{IT}} &= \sum_{i=1}^{N_k} \{(\mathbf{g}_{k(i)-AP} + \mathbf{G}_{IRS-AP}^H \boldsymbol{\theta}_k \mathbf{g}_{k(i)-IRS}) \sqrt{p_{k(i)}} \mathbf{x}_{k(i)}\} \\
 &+ \mathbf{z}_{e,k} + \mathbf{z}_{AP,k} \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서 첫 항은 WIT 그룹의 업링크 정보 신호, 두 번째와 세 번째 항은 각각 AP 의 자기 간섭과 AWGN ($\mathbf{z}_{AP,k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$)이다. $\mathbf{G}_{IRS-AP}^H \in \mathbb{C}^{M \times M_R}$ 는 IRS-AP 간의 채널을 의미한다. 위 수신 신호는 AP 의 수신 빔포밍 벡터 $\mathbf{w}_{k(i),k}$ 를 통해 다음과 같이 변환된다.

$$\hat{\mathbf{y}}_{AP,k}^{\text{IT}} = \mathbf{w}_{k(i),k}^H \mathbf{y}_{AP,k}^{\text{IT}} \quad (5)$$

업링크 WIT 성능 향상을 위해 본 논문에서는 RSMA 방식을 도입한다. 구체적으로, 각 사용자 $k(i)$ 의 메시지 $M_{k(i)}$ 는 두 개의 하위 메시지 $M_{k(i,1)}, M_{k(i,2)}$ 로 분할된다. 각 하위 메시지는 전력 $p_{k(i,1)}, p_{k(i,2)}$ 로 송신되며, AP 는 사전 정의된 복호화 순서 $\pi_{k(i),t}$ 에 따라 SIC 를 적용하여 복호화를 수행한다 [5].

$t \in \{1, 2\}$ 에서 사용자 $k(i)$ 의 하위 메시지 $M_{k(i,t)}$ 의 달성 가능한 전송률은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{k(i,t)}(\boldsymbol{\rho}) = t_k \log_2(1 + \gamma_{k(i,t)}(\boldsymbol{\rho})) \quad (6)$$

이때 $\boldsymbol{\rho}$ 는 $\{\boldsymbol{\theta}_k, \mathbf{v}_k, p_{k(i,t)}, t_k, \mathbf{w}_{k(i,t)}\}$ 을 의미하고, $\gamma_{k(i,t)}$ 는 SINR 을 의미하며, $p_{k(i,t)} \|\mathbf{w}_{k(i,t)}^H (\mathbf{g}_{k(i)-AP} + \mathbf{G}_{IRS-AP}^H \boldsymbol{\theta}_k \mathbf{g}_{k(i)-IRS})\|^2 / \{\sum_{\pi_{k(i),t'} > \pi_{k(i,t)}} p_{k(i,t')} \|\mathbf{w}_{k(i,t')}^H (\mathbf{g}_{k(i')-AP} + \mathbf{G}_{IRS-AP}^H \boldsymbol{\theta}_k \mathbf{g}_{k(i')-IRS})\|^2 + \beta \gamma \|\mathbf{v}_k\|^2 + \sigma_k^2\}$ 로 표현된다. 복호화 순서가 높은 하위 메시지들은 간섭으로 존재하게 된다. 여기서, $\beta \ll 1$ 은 잔여 자기 간섭 계수, γ 는 평균 채널 전력이며 $\beta \gamma \|\mathbf{v}_k\|^2$ 는 AP 의 에너지 신호에 따른 자기 간섭을 의미한다. 마지막으로 σ_k^2 는 AP 의 수신단에서 발생하는 잡음을 의미한다.

위 정의를 바탕으로 다음과 같이 총 전송률 최대화 문제를 공식화한다.

$$\max_{\boldsymbol{\rho}} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^2 R_{k(i,t)}(\boldsymbol{\rho}) \quad (7a)$$

$$\text{s. t. } R_{k(i,t)}(\boldsymbol{\rho}) \geq R_{k(i,t)}^{\min}, \quad \forall k, i, t, \quad (7b)$$

$$\begin{aligned}
 t_k p_{k(i)} + t_k p_{c,k(i)}^{\text{active}} + \sum_{n \neq k}^K t_n p_{c,k(i)}^{\text{passive}} \\
 \leq \sum_{n \neq k}^K t_n \Phi_{k(i),n}(\mathbf{v}_n, \boldsymbol{\theta}_n) + E_{k(i)}, \quad \forall k, i, \quad (7c)
 \end{aligned}$$

$$\|\mathbf{v}_k\|^2 \leq p^{\max}, \quad |[\boldsymbol{\theta}_k]_{m,m}| = 1, \quad \forall k, m, \quad (7d)$$

$$\|\mathbf{w}_{k(i,t)}\|^2 = 1, \quad \forall k, i, t, \quad (7e)$$

$$\sum_{k=1}^K t_k = T, t_k > 0, \quad \forall k, \quad (7f)$$

(7b)는 하위 메시지별 최소 전송률 보장을 나타낸다. (7c)는 사용자 $k(i)$ 가 메시지를 전송하는데 사용되는 에너지와, 물리적인 회로가 WIT 및 WET 로 동작하면서 소모되는 전력 $p_{c,k(i)}^{\text{active}}, p_{c,k(i)}^{\text{passive}}$ 에 따른 에너지의 합이 수확된 에너지와 초기 에너지 $E_{k(i)}$ 를 초과할 수 없음을 의미한다. (7d)-(7f)는 각각 AP 의 송신 전력 제한, IRS 위상 천이 행렬의 유닛 모듈러스 조건, 수신 빔포밍 벡터의 정규화, 그리고 시간 할당 제약을 나타낸다.

이 문제는 목적함수 및 제약조건 (7b), (7c)의 비볼록성으로 인해 직접적인 해결이 어렵다. 이에 따라, (7c)의 비선형 에너지 수확 모델에서 $\mathbf{v}_n, \boldsymbol{\theta}_n$ 를 공동 최적화하기 위해 슬랙 변수를 도입하고, 내/외부 루프에서 교차 최적화 (Alternating Optimization) 방식과 순차적 볼록 근사 (Sequential Convex Approximation) 기법을 적용하면서 반복 수행을 통해 수렴 해를 도출할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 실용적인 비선형 에너지 수확 모델에 기반한 WPCNs 에서 IRS 와 RSMA 방식을 결합한 새로운 전송 프레임워크를 제안하였다. 사용자 그룹을 기반으로 WIT/WET 역할을 분리하고, RSMA 구조를 통해 유연한 간섭 관리와 자원 분배를 수행하였다. 또한, 에너지 제약과 최소 전송률 요구를 고려하여 총 전송률을 최대화하는 최적화 문제를 구성하고, 슬랙 변수 도입, AO 및 SCA 기반 반복 최적화 기법을 통해 수렴 가능한 해를 도출할 예정이다. 향후 성능 검증 및 에너지 기반 그룹화 방식, 다중 IRS 환경으로의 확장이 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2020-II201787)

참고 문헌

- [1] D. Song, W. Shin and J. Lee, "A maximum throughput design for wireless powered communication networks with IRS-NOMA," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 4, pp. 849-853, April 2021.
- [2] H. Xie, B. Gu, D. Li, Z. Lin and Y. Xu, "Gain without pain: Recycling reflected energy from wireless-powered RIS-aided communications," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 15, pp. 13264-13280, 1 Aug. 2023.
- [3] Z. Yang, M. Chen, W. Saad, W. Xu and M. Shikh-Bahaei, "SumRate Maximization of Uplink Rate Splitting Multiple Access (RSMA) Communication," in IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 21, no. 7, pp. 2596-2609, 1 July 2022.
- [4] E. Boshkovska, D. W. K. Ng, N. Zlatanov and R. Schober, "Practical NonLinear Energy Harvesting Model and Resource Allocation for SWIPT Systems," in IEEE Communications Letters, vol. 19, no. 12, pp. 2082-2085, Dec. 2015.
- [5] S. Rezvani, E. A. Jorswieck, N. Mokari and M. R. Javan, "Optimal versus CSI-based SIC ordering in downlink multi-cell NOMA systems," ICC 2021-IEEE International Conference on Communications, Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 1-6.